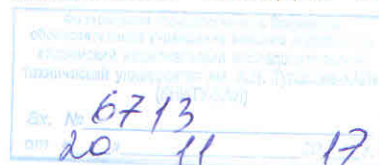


## Отзыв

официального оппонента на диссертацию Высоцкой Светланы Абдулмянафовны «Численное исследование вихревых структур и автоколебаний давления в ракетном двигателе твердого топлива с утопленным соплом» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

На отзыв представлены диссертационная работа на 85 стр. и 2 стр. приложение, в которой 33 рисунка, 5 таблиц, 85 источников и автореферат диссертации на 16 страницах, включая 8 рисунков и список трудов автора, отражающих содержание диссертационной работы.

Проблема продольной акустической неустойчивости и ее связь с динамическим процессом горения возникла с момента создания и отработки первых пороховых ракет. Наиболее остро данная проблема проявила себя при отработке ракетных двигателей с быстрогорящими составами, т.е. при значительных скоростях вдува от поверхности горения в осевой поток в камере сгорания ракетного двигателя и формировании значительного по толщине радиального потока. Неравномерное распределение давления и скорости по радиусу и наличие осевого потока приводит к формированию значительной по толщине переходной турбулентной зоны, в которой в зависимости от соотношения относительных скоростей взаимодействующих потоков могут формироваться вихревые структуры. Как показывают экспериментальные исследования, способность сохранять вихревую основу движения в газовой среде определяется в основном величиной соотношения скоростей взаимодействующих потоков или скоростью потока при обтекании тела находящегося в потоке. Внезапные сужения или расширения каналов также может приводить к появлению значительной турбулентности и вихреобразованию в потоке. Применительно к проточной части камеры сгорания РДТТ процессы газодинамической неустойчивости с вихреобразованием в потоке могут приводить к дополнительным газодинамическим источникам, которые оказывают существенно влияние на условия возникновения автоколебательных режимов его работы, формирующих различного вида акустической неустойчивости в камере сгорания двигателя. Для РДТТ с быстрогорящими топливными составами эта проблема в виде продольной акустической неустойчивости возникла в конце 70 годов прошлого столетия. Изучение данной проблемы затруднено в связи с высокой температурой продуктов сгорания и значительными по величине скоростями движения газа. Физическое моделирование с помощью «холодного» газа позволило частично решить данную проблему и построить определенные закономерности влияния конструктивных элементов на условия формирования акустической неустойчивости различных конструктивных элементов проточной части камеры сгорания на модельном РДТТ со вдувом с «горящей» поверхности. Развитие численных методов и





рост вычислительных мощностей позволили создать целый спектр программных продуктов с помощью которых задачи газодинамического исследования движения продуктов сгорания и возникновения акустических колебаний в камере сгорания позволили не только анализировать различные проблемы формирования потока в камере сгорания, но и моделировать различное поведение и взаимодействия в потоке продуктов сгорания. Но у каждого из этих решений имеются свои недостатки и свои преимущества, однако с высокой долей достоверности данная газодинамическая задача для камеры сгорания РДТТ не решена полностью.

Представленная диссертационная работа Высоцкой С.А. это еще одна попытка численными методами промоделировать условия возникновения нестационарного газодинамического процесса формирования газового потока в камере сгорания и попыткой объяснения условий возникшего в ней автоколебательного режима в процессе работы РДТТ. Поэтому данная работа выполнена на актуальную проблему, связанную с продольной неустойчивостью работы ракетных двигателей на твердом топливе и решена задача по моделированию течений в газовом тракте камеры сгорания со сложными геометрическими границами. Таким образом, направление исследований, представленное в работе Высоцкой С.А. является **актуальным**.

Работа имеет **практическую значимость**, поскольку позволяет моделировать условия формирования вихрей не только на входе в утопленное сопло, но и по газовому тракту камеры сгорания при наличии автоколебательного режима в газовом потоке и нестационарного режима горения твердого топлива.

**Научная значимость** работы состоит в том, что собранный алгоритм решения сложной газодинамической задачи позволяет применить обычную вычислительную технику, доступную простому пользователю. **Научная новизна** состоит в том, что путем подбора определенных алгоритмов создана инженерная методика и алгоритм расчета для осесимметричной постановки нестационарного течения продуктов сгорания в камере сгорания РДТТ с учетом неравномерного газоприхода с горячей поверхности, позволяющего моделировать и выстаивать влияние этого газоприхода на формирование вихревой неустойчивости по проточной части камеры сгорания. Следовательно, разработанный алгоритм применительно к исследованию вихревых структур в камере сгорания РДТТ **является новым**.

Рассматриваемые научные положения в работе базируются на общепринятых численных методах расчета турбулентных течений, удовлетворительным согласованием полученных расчетных данных с экспериментальными данными и исследованиями других авторов.

По структуре диссертационная работа Высоцкой С.А. «Численное исследование вихревых структур и автоколебаний давления в ракетном двигателе твердого топлива с утопленным соплом» состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы и приложения.



В первой главе приведен краткий обзор литературных источников по проблеме возникновения вихревых структур в камере сгорания РДТТ, известные теории и численные методы, используемые для расчета вихревых процессов в проточной части камеры сгорания, поставлена цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе проведен анализ современных программных продуктов, позволяющих исследование влияния параметров газового потока с конкретными граничными и начальными условиями. В силу недостаточности ресурсов вычислительных систем, находящихся в пользовании Высоцкой С.А. обоснована программная среда с использованием моделей  $k-\epsilon$  турбулентности как использование высокорейнольдсовой и низкорейнольдсовой версий для различных участков газового тракта камеры сгорания РДТТ с утолщенным соплом для моделирования вихреобразования.

В третьей главе рассмотрены вопросы моделирования рабочего процесса в камере сгорания при формально заданных граничных и начальных условиях. Приведены результаты выбора и оценки сеточного разбиения расчетной области для двухмерной осесимметричной задачи течения продуктов сгорания твердого топлива и газоприхода от горячей поверхности. Приведены результаты моделирования течения газа для установившейся продольной акустической волны. Достаточно подробно приведены результаты газодинамического моделирования течения с насадком на входе в утолщенное сопло. По результатам моделирования сделаны выводы.

К основным замечаниям необходимо отнести:

1. Оформление диссертационной работы выполнено с нарушением ГОСТ7.32-2001 - отсутствует реферат, список сокращений и обозначений, выводов по первой и второй главам работы, имеются стилистические ошибки.

2. В рамках «Научная новизна» - трактовка, что «причиной возникновения пульсирующего режима горения в РДТТ могут быть интенсивные тороидальные вихри» ничем не подтверждено и является голословным

3. Формально заданная функция колебания давления по длине канала заряда во времени в виде стоячей волны (формула 41 на стр.45) не корректна для потока газа по проточной части камеры сгорания, поскольку частоты акустических колебаний по потоку и против потока будут разные и если скорость потока меняется по длине каналу от 0 м/сек у переднего днища до 100 - 150 м/сек (стр. 46) на входе в утолщенное сопло, то при скорости звука в продуктах сгорания 1040 м/сек (стр. 49) частота собственных колебаний в газовом потоке будет отличаться от акустических колебаний неподвижной среды на  $\pm (10-15)\%$  - эффект Доплера для акустических колебаний в газовых потоках еще никто не отменял, следовательно,



продольная акустическая волна физически возникнуть не может по потоку в канале камеры сгорания РДТТ.

4. Заданное значение величины амплитуды колебания давления от рабочего –  $0,1 P_k$  и его распределение по длине поверхности горения по каналу по гармоническому закону - это наперед заданный режим работы РДТТ, что фактически не реализуется по факту. Как показывают исследования, мгновенное давление в зоне (очаг) горения, да и сама зона горения твердого топлива колеблется как во времени, так и по координате по поверхности горения.

5. Горение твердого топлива определяется не только показателем степени в законе горения. Для разных топлив с одинаковым показателем в законе горения структура возникновения нестационарного режима горения определяется не только величиной давления, но и амплитудой и частотой колебания давления, амплитудой и частотой тепловых колебаний, колебаниям скорости химических реакций и разложений в твердом топливе и т.д. Поэтому, данное утверждение применительно к конкретному топливу не обладает новизной, поскольку не учтены все особенности процессов горения твердого топлива.

6. В работе рассмотрена одна форма канала (рисунки 18,19,21,22,23 и т.д.) а в положениях, выносимых на защиту и новизне подтверждено существенное «влияние формы канала,» и далее по тексту. В работе нет анализа различных форм канала проточной части камеры сгорания, исследована одна форма канала в определенный момент времени без изменения геометрии при выгорании топлива, тем более различных геометрических изменений проточной части, хотя бы для примера - влияние изменения одного геометрического параметра канала проточной части (изменение высоты или длины или радиуса и т.п.) камеры сгорания. Некорректно выносимое на защиту положение и новизны работы.

7. Согласно исследованиям (в том числе - Чжен П. Отрывные течения. М.: Мир, 1973. Т.2. 280 с.) интенсивность и период существования вихря зависит от многих факторов и в первую очередь за счет градиента скорости в зоне его возникновения. Акустическая частота вихря определяется колебанием ядра в вихре. Из работы не вытекает как собственная частота вихря, зародившегося у переднего днища изменяет или влияет на акустические колебания в камере сгорания? Частотные взаимодействия вихревой структуры и акустические колебания в волновом поле камеры сгорания через какие механизмы они взаимодействуют? Из работы не ясно, т.к. поскольку в приведенных результатах расчета отсутствуют изменения расчетных параметров во времени, а, следовательно, алгоритмы определения частоты их проявлений, тогда возникает вопрос, а как это связано с продольной акустической неустойчивостью в работе камеры сгорания РДТТ?

8. Как можно в процессе проектирования оценить «вероятность возникновения пульсирующего режима горения в РДТТ» (пункт 10 в



Заключении диссертационной работы и п. 8 в основных результатах и выводах автореферата диссертации) если в алгоритм программы изначально задается автоколебательный режим с величиной амплитуды в 10% от рабочего давления в камере сгорания? При проектировании новых РДТТ для конструктора одной из важнейших задач стоит задача определение уровня возможных колебаний давления и частота их реализаций в зависимости от проектируемой формы проточной части для конкретного топливного заряда.

9. Не соответствие количества выводов по диссертационной работе, представленных в ее заключении и количества основных результатов и выводов, представленных в автореферате диссертации 10 пунктов в диссертации, 8 пунктов в автореферате диссертации, первые два вывода опущены в автореферате, остальные пункты идентичны.

В целом работа, связанная с проведенным анализом различных вычислительных алгоритмов, применяемых в процессах моделирования вихревых течений в проточной части ракетных двигателей и попытка объяснений нестационарных проявлений в работе РДТТ заслуживает положительной оценки. Высоцкая С.А. проделала значительную научно-исследовательскую работу в области проработки и адаптации вычислительных алгоритмов для понимания физических процессов в камере сгорания двигателя. Результаты работы доложены на 5 научно-технических конференциях и 2 статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК.

Диссертационная работа выполнена на достаточном методическом и научном уровне, является законченной в рамках поставленных задач и соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата технических наук, по специальности: 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, а соискатель Высоцкая Светлана Абдулмянафовна заслуживает присуждения степени – кандидат технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

 А.Ф. Сальников

Дата подписи отзыва: 1 ноября 2017 г.

Организация; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,  
Адрес: 614600, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, Телефоны: (342) 2198–067, 2198–179, E-mail: [rector@pstu.ru](mailto:rector@pstu.ru)

Фамилия, имя, отчество автора отзыва: Сальников Алексей Федорович, доктор технических наук, профессор.

Должность: профессор кафедры Ракетно-космической техники и энергетических систем, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Виброакустического контроля и диагностики» ПНИПУ.



Телефон: 8 902 804 20 21

Адрес электронный почты: [afsalnikov\\_1@mail.ru](mailto:afsalnikov_1@mail.ru)

Список основных публикаций:

1. Кашина И.А., Сальников А.Ф. Исследование влияния диссипативных свойств конструктивных элементов ракетных двигателей на твердом топливе.// Труды Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана № 607 «Теория и практика современного ракетного двигателестроения», М. из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013 г. С 146-151

2. Кашина И.А., Сальников А.Ф. Методы определения собственных частот элементов системы ракетного двигателя твердого топлива. // Электронный журнал «Труды МАИ» , выпуск 65, 2013 г  
[/www.mai.ru/science/trudy/](http://www.mai.ru/science/trudy/)

<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35841>

3. Кашина И.А., Сальников А.Ф. Сравнительный анализ методов определения собственных частот конструктивных элементов системы РДТТ.// Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2013. № 6. С. 26-30.

4. Пермяков К.В., Сальников А.Ф. Анализ динамических нагрузок выхлопного тракта по косвенным измерениям нагрузок на стенки.// Главный энергетик. 2013. №4, С. 32-34

5. Шелудяков А.М., Сальников А.Ф. Исследование режимов работы насоса на возбуждение колебаний стрелы РПК// Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2014. Т. 1. С. 251-253

6. Пермяков К.В., Сальников А.Ф., Деева С.С. Особенности работы и исполнения диффузора в составе тракта газоперекачивающего агрегата// Газовая промышленность. 2014. № 6 (707). С. 78-79.

7. Кашина И.А., Сальников А.Ф. Исследование влияния диссипативных свойств конструктивных элементов на внутрибаллистические характеристики ракетного двигателя твердого топлива. // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2014. № 2 (95). С. 94-99

8. Пермяков К.В., Сальников А.Ф. Исследование работоспособности выхлопного тракта газоперекачивающего агрегата. // Вестник машиностроения. 2014. № 6. С. 47-49.

9. Петрова Е.Н., Кашина И.А., Сальников А.Ф. Методика газодинамического моделирования влияния конструктивных элементов при разработке и проектировании новых двигателей.// В сборнике: ВОСЬМАЯ всероссийская конференция «внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (ICOC'2014) Ижевск, 2014. С. 264-271.

10. Petrova E.N., Salnikov A.F. GAS-DYNAMIC MODELING OF GAS FLOW IN SEMI-CLOSED SPACE INCLUDING CHANNEL SURFACE FLUCTUATION.// AIP Conference Proceedings 18. Сер. "International Conference on the Methods of Aerophysical Research, ICMAR 2016: Proceedings

of the 18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research" 2016. С. 030071.

11. Петрова Е.Н., Кашина И.А., Сальников А.Ф. Алгоритм определения диссипации энергии при колебаниях топливного заряда ракетного двигателя. // В книге: 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» 2016. С. 553-554.

12. Петрова Е.Н., Сальников А.Ф. Динамическое взаимодействие продуктов сгорания с конструктивными элементами камеры сгорания РДТТ. // Химическая физика и мезоскопия. 2016. Т. 18. № 3. С. 343-348.

Подпись Сальникова А.Ф. заверяю:

Ученый секретарь ПНИИ

К.и.н., доцент



Макаревич В.И.